

Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento

Adriano S. Fortes, Joaquim A. O. Barros, Ivo J. Padaratz

Relatório 02-DEC/E-13

*Relatório da investigação desenvolvida no âmbito do programa de Doutoramento de
Adriano S. Fortes*

Data: Maio de 2002

Nº de páginas: 32

Palavras-chave: Laminados de fibras de carbono, reforço à flexão, adesivos epoxídicos



Escola de
Engenharia



Departamento de
Engenharia Civil



Universidade
do Minho

Índice

Azurém, 4800-085 Guimarães - Tel. 253 510 200 - Fax 253 510 217 - E-mail secG@civil.uminho.pt

1 – Introdução	3
2 – Programa Experimental	4
2.1 – Caracterização dos Materiais	4
2.1.1 – Betão	
2.1.2 – Armaduras Convencionais	6
2.1.3 – Laminado de CFRP	6
2.1.4 – Adesivo Epoxídico	7
2.2 – Características das Vigas	8
2.2.1 – Introdução	8
2.2.2 – Geometria, Condições de Apoio e de Carregamento	9
2.2.3 – Procedimentos de Reforço	11
2.3 – Equipamentos e Procedimentos de Ensaio	12
2.4 – Apresentação e Análise dos Resultados	14
2.4.1 – Modos de Rotura	14
2.4.2 – Cargas de Fendilhação	20
2.4.3 – Extensões nos Laminados	21
2.4.4 – Respostas Carga vs. deslocamento	
3 – Conclusões	30
4 – Agradecimentos	31
5 – Referências Bibliográficas	31

1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono – *CFRP* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), vêm sendo utilizados em diversos países. No Japão, a sua utilização está relacionada com problemas resultantes de abalos sísmicos, nos Estados Unidos devido a problemas de durabilidade de pontes e viadutos e em países da Europa devido a preocupações com a reabilitação do património histórico. No Brasil, além dos mesmos problemas dos Estados Unidos e Europa, existem quantidades significativas de modificações na utilização das edificações, tornando necessário o reforço de suas estruturas, para adequá-las às novas solicitações e exigências funcionais.

O sistema de reforço por meio de chapas metálicas ou de encamisamento por adição de betão tem vindo a ser substituído pela técnica de colagem de *CFRP*. Tal deve-se, principalmente, à facilidade de aplicação do sistema, às excelentes propriedades mecânicas e de durabilidade do *CFRP*.

No intuito de aumentar a mobilização da capacidade resistente do *CFRP*, Blaschko *et al.* (1999) e Barros *et al.* (2000) propuseram, recentemente, uma nova técnica de reforço constituída pela inserção de faixas de laminados de *CFRP* em entalhes executados no betão de recobrimento das armaduras de elementos estruturais. Estes investigadores obtiveram resultados encorajadores em viga e laje, Blaschko *et al.* (1999), e em pilares, Barros *et al.* (2000). Blaschko *et al.* (1999), apresentaram uma comparação entre resultados de ensaios realizados em lajes e vigas reforçadas por colagem externa de laminados de fibras de carbono e segundo a nova técnica. No entanto, o número reduzido de ensaios realizados pelos autores (uma viga e uma laje), apenas infere a viabilidade da técnica.

Apesar desta técnica nova ter-se revelado promissora, a última publicação do grupo de trabalho 9.3 do CEB-FIP - *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, apenas chama a atenção para a sua existência. No entanto, esta técnica apresenta algumas vantagens em relação à tradicional colagem do laminado na superfície dos elementos estruturais, nomeadamente:

- Maior resistência à ocorrência do fenómeno de *peeling*, dada a existência de dupla área de colagem do laminado e de este se encontrar confinado;

- Maior protecção ao fogo e aos actos de vandalismo;
- Redução da quantidade de *CFRP* empregue;
- Redução da superfície de betão a tratar, com consequente redução do tempo de execução do sistema de reforço;
- Garantia da qualidade da superfície de betão onde o laminado será aplicado, devido ao corte ser executado com equipamento mecânico.

O pouco conhecimento sobre o tema, motivou um grupo de Investigadores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho - Portugal, a desenvolver investigação no âmbito da análise do comportamento das estruturas de betão armado reforçadas segundo esta técnica. As pesquisas que estão sendo desenvolvidas com objectivo de determinar o comprimento de fixação do laminado (o mesmo utilizado no presente trabalho) ao betão indicam que cerca de 100 mm é suficiente para mobilizar a capacidade resistente do laminado (Cruz *et al.* 2001).

Neste trabalho apresenta-se um estudo experimental com vigas de betão armado reforçadas segundo esta nova técnica. Os resultados demonstram a viabilidade e a eficácia da técnica proposta.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Caracterização dos Materiais

2.1.1 Betão

Na betonagem das vigas utilizou-se um betão da classe C30/37 (CEB-FIP Model Code 1990). A Tabela 1 inclui a composição do betão, tendo-se obtido valores de slump próximos dos 40 mm para esta composição.

Tabela 1 – Composição da amassadura do betão.

Componentes	Quantidade (kg/m ³)
Areia (0-5 mm)	627
Brita (5–15 mm)	1049
Cimento 42.5 R	400
Água	200

Os ensaios das vigas foram realizados em idades superiores a 90 dias. Na data dos ensaios das vigas foram realizados ensaios de compressão uniaxial em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e, aproximadamente, 300 mm de altura, tendo-se obtido uma resistência média à compressão de 46.1 MPa. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão efectuados com os cilindros pertencentes às séries de vigas ensaiadas.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios à compressão sobre provetes cilíndricos.

Série	Provete	Peso (N)	Peso Específico (kN/m ³)	Idade (dias)	Rotura	
					Carga (kN)	Tensão (MPa)
S1 (V1 e V1R1)	CC1	122.5	23.1	92	840.2	47.5
	CC2	123.8	23.3		751.1	42.5
	CC3	122.7	23.3		812.7	46.0
S2 (V2 e V2R2)	CC4	122.7	23.3	93	864.8	48.9
	CC5	123.2	23.5		878.4	49.7
	CC6	123.5	23.4		850.8	48.1
S3 (V3 e V3R2)	CC7	125.0	23.6	92	762.9	43.2
	CC8	123.5	23.3		747.9	42.3
S4 (V4 e V4R3)	CC9	123.7	23.3	103	785.7	44.5
	CC10	124.5	23.5		853.3	48.3
			23.36 ⁽¹⁾			46.10 ⁽¹⁾ , 2.64 ⁽²⁾ , 5.7% ⁽³⁾

⁽¹⁾ Média, ⁽²⁾ Desvio padrão, ⁽³⁾ Coeficiente de variação

O modo de rotura dos provetes de betão foi característico de ensaios de compressão uniaxial em provetes cilíndricos em prensa com rótula no prato superior e sem qualquer elemento na interface entre os pratos de aço da prensa e as superfícies polidas do provete (ver Figura 1).



Figura 1 – Modos típicos de rotura de provetes das séries S1, S2 e S3, após submetidos a ensaios de compressão uniaxial.

2.1.2 – Armaduras Convencionais

A armadura convencional longitudinal das vigas era constituída por varões de 6 mm e 8 mm de diâmetro, sendo de 6 mm e de 3 mm o diâmetro dos estribos (ver Figuras 6 e 7). Dos ensaios de tracção uniaxial constatou-se que os varões de 6 mm e 8 mm apresentaram um comportamento linear-elástico até aproximadamente 750MPa ($\phi 6$) e 500 MPa ($\phi 8$), respectivamente, seguido de comportamento com grandes deformações plásticas, Barros *et al.* (2002).

2.1.3 – Laminado de CFRP

Na campanha de ensaios foi utilizado laminado de *CFRP* de secção transversal igual a 9.59 ± 0.09 mm de largura e 1.45 ± 0.005 mm de espessura. Com base nos resultados obtidos em ensaios de tracção uniaxial, Figura 2, realizados por Cruz *et al.*, 2001, segundo as recomendações da ISO 527-5:1997, verificou-se que o valor médio do módulo de Young, da resistência à tracção e da extensão destes laminados é de 158 GPa, 2700 MPa e 17 %, respectivamente.



Figura 2 – Provetes de laminados de *CFRP* (esquerda) e rotura típica dos laminados em ensaio de tracção uniaxial (direita).

2.1.4 – Adesivo Epoxídico

O adesivo epoxídico utilizado para colar o laminado de *CFRP* ao betão possui propriedades de tixotropia, elevada aderência e coesão, segundo as descrições que constam do manual do fabricante. É fornecido em bi-componente, isento de solvente, devendo-se misturar os componentes na proporção de 2:1.

Conforme Cruz *et al.* (2001), o comportamento à tracção do adesivo pode ser obtido experimentalmente, efectuando-se ensaios de tracção uniaxial segundo as recomendações da ISO 527-3:1997, tendo-se para tal utilizado provetes semelhantes aos da Figura 3.

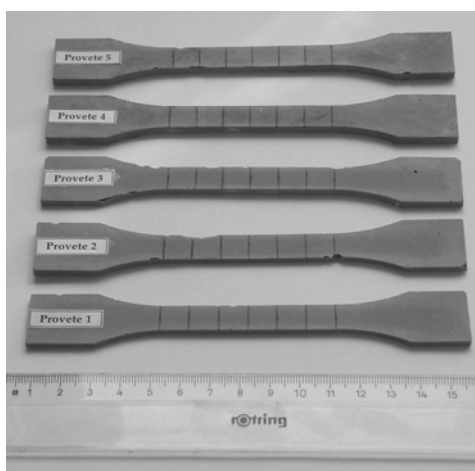


Figura 3 – Provetes de adesivo epoxídico preparados para ensaio de tracção uniaxial (Cruz *et al.* 2001).

A Figura 4 mostra a resposta tensão vs. extensão obtidos por Cruz *et al.* 2001 para os cinco provetes apresentados na Figura 3. Os provetes desenvolveram comportamento semelhante, excepto o provete 4, em que a diferença, segundo os referidos autores, está relacionada com a presença de pequenos vazios observados na superfície de fractura dos provetes 1, 2, 3 e 5, ver Figura 5. O módulo de Young apresentou o valor médio de $5,09 \pm 0,59$. GPa .

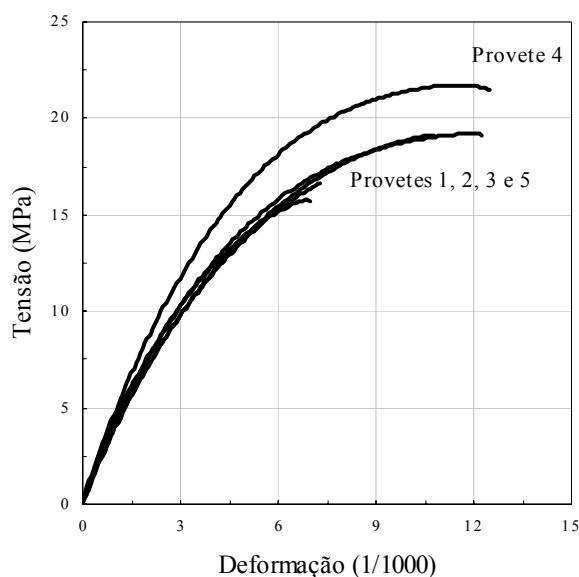


Figura 4 – Diagramas de tensão vs. deformação para provetes de adesivo epoxídico.

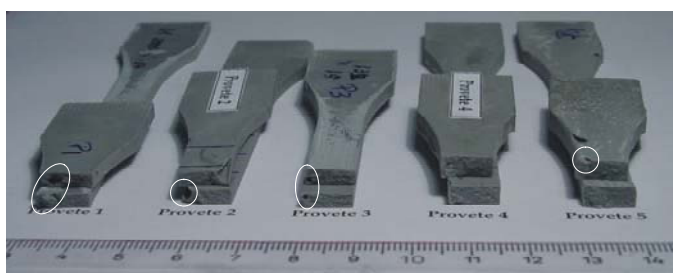


Figura 5 – Superfície de fractura dos provetes de adesivo epoxídico, com a presença de pequenos vazios (Cruz *et al.* 2001).

2.2 Características das Vigas

2.2.1 – Introdução

Com objectivo de avaliar o comportamento de vigas de betão armado reforçadas segundo a técnica proposta no presente trabalho, nos aspectos relacionados com o modo de rotura, com a capacidade de carga e com a rigidez da resposta, foram construídas e ensaiadas oito vigas de secção transversal rectangular. As vigas foram distribuídas em

quatro séries de dois exemplares, tendo cada série diferente percentagem de armadura longitudinal, ver Tabela 2 e Figuras 6 e 7.

O reforço foi dimensionado de forma a que a capacidade de carga das vigas reforçadas fosse aproximadamente dupla da correspondente viga não reforçada, resultando três sistemas de reforço compostos por um, dois e três laminados, dependendo da percentagem de armadura longitudinal de cada série.

2.2.2 – Geometria, condições de apoio e de carregamento

As oito vigas tinham secção com 100 mm de largura e 170 a 180 mm de altura, comprimento de 1600 mm e vão de 1500 mm. A Figura 9 mostra a secção transversal das vigas com a disposição das armaduras e dos laminados de *CFRP* utilizados no reforço. Todas as vigas foram betonadas em moldes de 200 mm de altura, onde foi lançado o betão até preencher 170 mm de altura. Devido às dificuldades encontradas em manter as vigas com a mesma altura, após o desmolde, foram realizadas medidas em sete posições ao longo do comprimento das vigas. Nas verificações de cálculo foi adoptada a média dos valores encontrados. As dimensões e a designação das vigas ensaiadas estão apresentadas na Tabela 2. Nesta Tabela indica-se ainda o cociente entre a área da secção transversal de laminado (A_L) e a área da secção transversal da armadura longitudinal convencional (A_S).

Tabela 2 – Características geométricas das vigas

Série	Viga	Peso (N)	Idade (dias)	Dimensões (mm)			$\frac{A_L}{A_S}$ (%) ⁽¹⁾
				Base	Altura	Comprimento	
S1	V1	690.6	92	100	178	1592	25.2
	V1R1	671.8		100	170	1600	
S2	V2	680.4	96	100	173	1600	33.6
	V2R2	695.2		100	177	1600	
S3	V3	687.4	92	100	175	1600	26.7
	V3R2	692.4		100	175	1600	
S4	V4	692.8	103	100	175	1600	28.3
	V4R3	711.6		100	180	1600	

(1) A_L – área da secção transversal de laminado de *CFRP*, A_S – área da secção transversal da armadura longitudinal

2.2.3 – Procedimentos de Reforço

A técnica utilizada no reforço das vigas consiste basicamente nas seguintes etapas:

- a) Execução de entalhes no betão de recobrimento com, aproximadamente, 3 a 4 mm de espessura por 12 mm de profundidade. Para a realização desta etapa foi utilizado um equipamento dispondo de disco de corte, ajuste da profundidade de corte, quatro rodas para deslocações simples, marca de posição de corte e conexão para aspirador, entre outros dispositivos;
- b) Limpeza do entalhe executado no betão de recobrimento, procurando-se retirar todo o pó provocado pelo corte do betão. Para efectuar esta limpeza utilizou-se jacto de ar comprimido;
- c) Limpeza do laminado de *CFRP* utilizando-se pano humedecido com acetona;
- d) Mistura do adesivo epoxídico bi-componente. As quantidades do adesivo foram obtidas por pesagem, na proporção de 2 por 1, entre as partes do produto, conforme as recomendações do fabricante;
- e) Imediatamente após a homogeneização da mistura, o adesivo foi aplicado ao longo de todo o entalhe, procurando-se preenche-lo por completo. Esta tarefa foi executada utilizando-se uma espátula;
- f) Aplicação do adesivo em toda a superfície do laminado, por intermédio da utilização de uma espátula;
- g) Inserção do laminado no entalhe. Com ajuda de uma espátula procurou-se preencher todo o entalhe, evitando-se a formação de vazios, e retirando-se o adesivo excedente;

Todos os possíveis mecanismos de controlo devem ser adoptados de forma a assegurar-se um correcto sistema de reforço.

A Figura 8 ilustra a etapa de execução dos entalhes no betão, na face inferior das vigas e a Figura 9 mostra o aspecto final dos entalhes.



Figura 8 – Execução dos entalhes no betão de recobrimento, na face inferior das vigas.



Figura 9 – Aspecto final dos entalhes.

2.3 – Equipamentos e Procedimentos de Ensaio

Para realização dos ensaios foi utilizado um pórtico metálico de reacção, onde estava fixado o actuador hidráulico que aplicava o carregamento na viga em resposta ao comando emitido pelo sistema de controlo do ensaio (ver Figura 10).

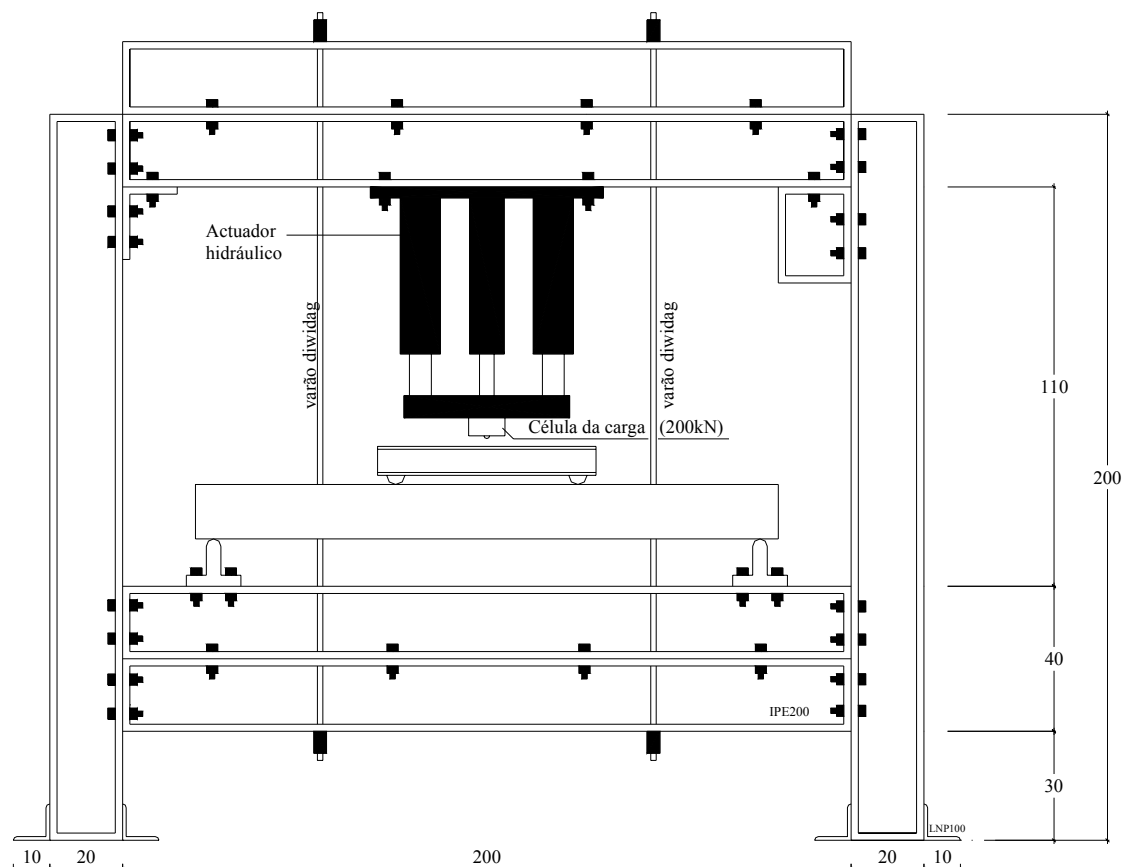


Figura 10 – Esquema do pórtico de reacção

Os ensaios foram realizados por controlo de deslocamento, segundo uma velocidade de aproximadamente $20 \mu\text{m/s}$ até ser alcançada a rotura das vigas. Os deslocamentos foram obtidos através da leitura de cinco transdutores de deslocamentos lineares (*LVDTs*), ligados ao sistema de aquisição de dados.

Com o objectivo de avaliar as extensões longitudinais no *CFRP*, ao longo do carregamento, foram instalados três extensómetros eléctricos (Ext.1, Ext.2 e Ext.3). As extensões registadas permitiram avaliar as tensões longitudinais no laminado (ver Figura 11).

As vigas ensaiadas possuíam apoio simples em suas extremidades, sendo solicitadas por duas cargas concentradas, de igual intensidade e equidistantes dos extremos, aplicadas a $1/3$ do comprimento entre os apoios, ver Figura 12. Esse procedimento possibilitou estudar o reforço em regiões onde existia apenas momento flector (flexão pura) e em regiões onde coexistiam esforços de flexão e corte (flexão simples).

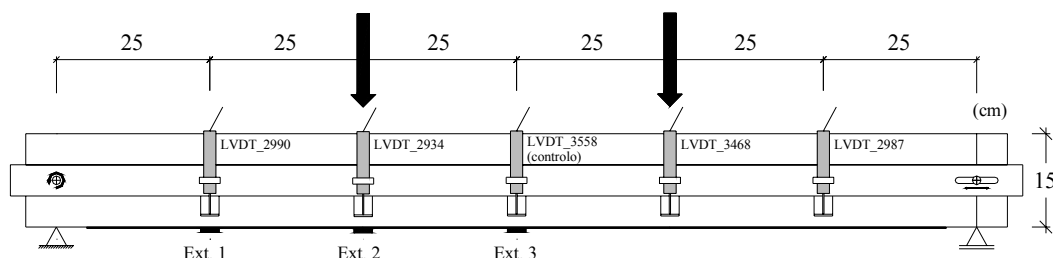


Figura 11 – Disposição dos transdutores de deslocamento (LVDTs) e extensómetros eléctricos (Ext.1, Ext.2 e Ext.3).

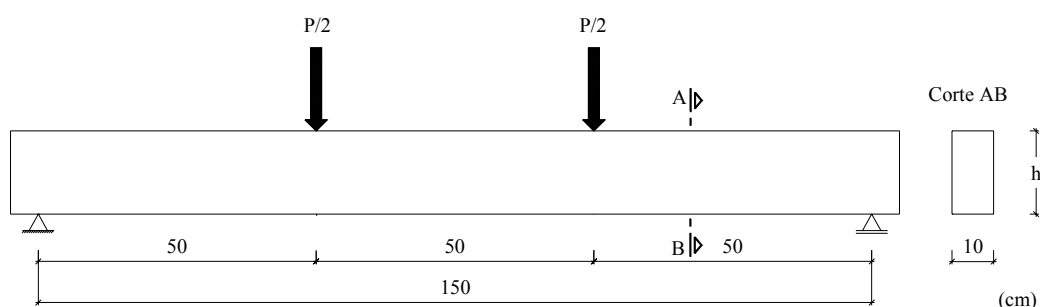


Figura 12 – Esquema de aplicação de cargas nas vigas.

2.4 Apresentação e Análise de Resultados

2.4.1 Modos de Rotura

• Vigas de Referência

As vigas utilizadas como modelo de referência (V1, V2, V3 e V4) apresentaram o tipo de rotura esperado e compatível com o dimensionamento, isto é, a rotura foi dúctil com cedência da armadura longitudinal, sem ocorrência de esmagamento do betão comprimido, nem rotura por corte.

• Vigas Reforçadas

A rotura de todas as vigas reforçadas deu-se por rompimento do betão do banzo traccionado, ao longo de, praticamente, toda a extensão do laminado, excepto na viga V1R1, em que se optou por interromper o ensaio quando a viga apresentava flecha elevada. Nas vigas V2R2 e V4R3 a camada de betão destacada chegou a 50 mm de

espessura, e a 60 mm na viga V3R2, tendo a armadura longitudinal ficado exposta. As Figuras 13 e 14 mostram o estado das vigas no instante da rotura. Da observação do estado das vigas reforçadas verificou-se que o laminado estava perfeitamente aderente ao adesivo, o qual continha fragmentos de betão, revelando que durante a rotura foi mobilizada a resistência ao corte do betão envolvente.

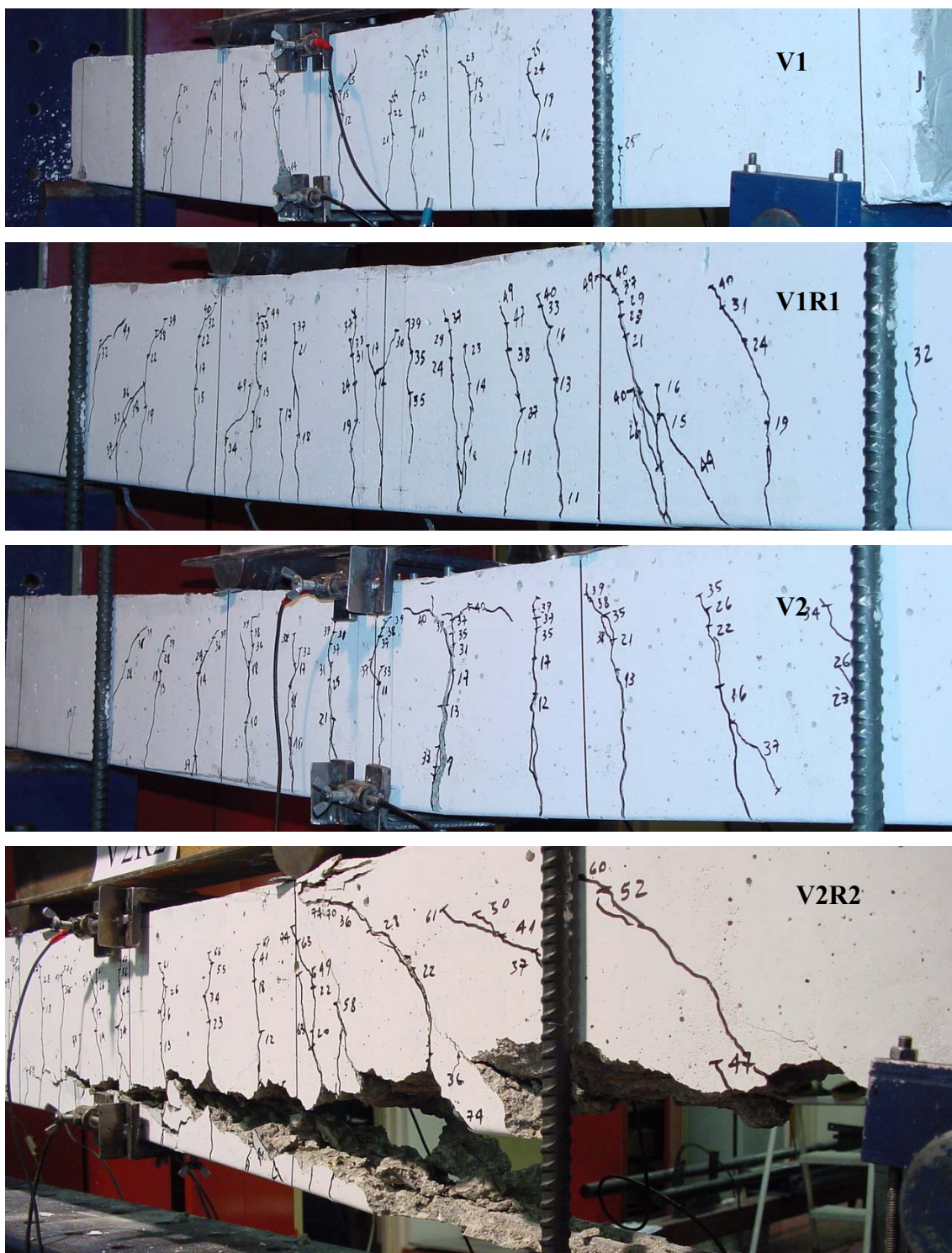


Figura 13 – Rotura das vigas V1, V1R1, V2 e V2R2.

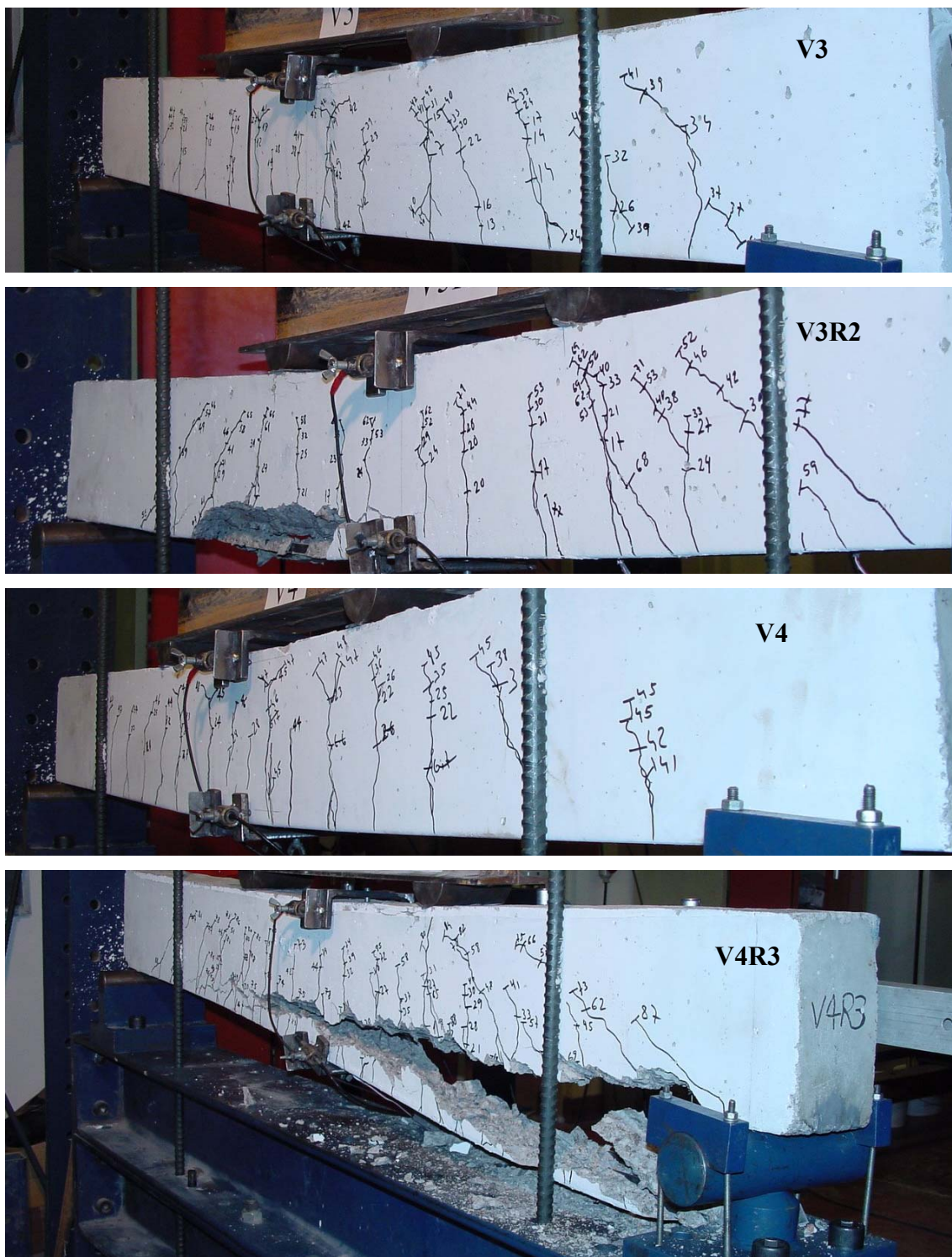


Figura 14 – Rotura das V3, V3R2, V4 e V4R3

Nos vãos de corte, na face inferior das vigas reforçadas, verificou-se que as fendas inclinaram-se no sentido do centro da viga (ver Figura 15).

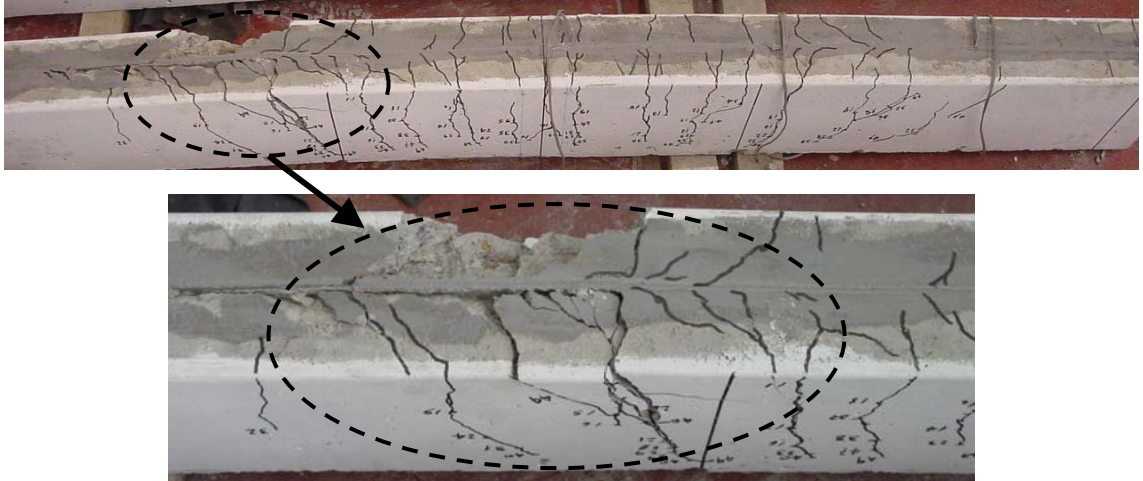


Figura 15 – Face inferior da viga V1R1.

Na Figura 16 representa-se um esquema que pretende justificar o sentido das referidas fendas. Entre a secção S1 e S2 desenvolve-se um diferencial de esforço de tracção ΔF (ver Figura 16a,b,c) equilibrado pelas tensões tangenciais τ_L aproximadamente iguais às tensões τ_c na interface adesivo-betão (ver Figura 16d). As tensões τ_c impõem deformações de corte originando micro-bielas de compressão (F_c) e de tracção (F_t). Dado que ΔF diminui da extremidade do laminado para a zona de flexão pura na viga ($\Delta F \cong 0$ na zona de flexão pura), o ângulo entre a direcção das micro-bielas de tracção e o eixo da viga diminui justificando o padrão de fendilhação observado na face inferior da viga.

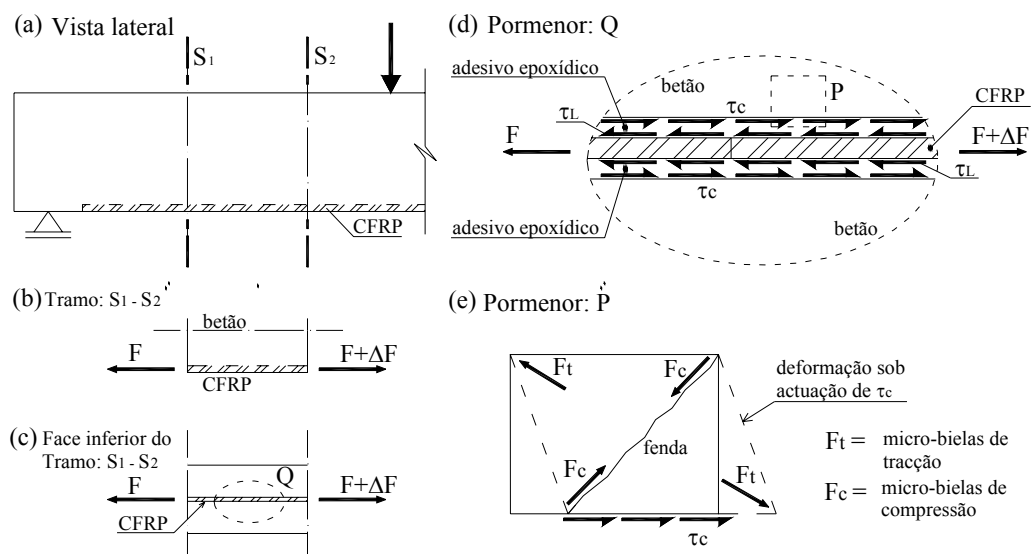


Figura 16 – Mecanismo justificativo da orientação das fendas do vão de corte, na face inferior das vigas.

Aparentemente as cargas de rotura das vigas reforçadas não estão relacionadas com o destacamento do reforço (*peeling*), mas sim com a rotura por tracção-corte do betão de uma zona próximo das armaduras convencionais de tracção. Nas vigas reforçadas, o acréscimo de carga, após a cedência da armadura longitudinal, é absorvida pelos laminados de *CFRP*. As tensões de tracção no laminado de *CFRP* são transferidas para o betão do substrato por meio de tensões de corte. A resultante destas tensões de corte (ΔF - ver Figura 17) está aplicada próxima do centro geométrico da secção do laminado de *CFRP*, excêntrica em relação à superfície de “fraqueza” do betão, localizada junto à face inferior das armaduras longitudinais, onde há maior concentração de vazios (superfície mais frágil), pelo que a resistência do betão nesta superfície é inferior. A força ΔF introduz tensões de corte e de tracção nesta superfície, que por apresentar menor resistência, a rotura, geralmente, ocorre nesta região. No entanto, a excentricidade entre o ponto de aplicação de ΔF e esta superfície é menor do que no caso da técnica tradicional de laminados colados sobre a superfície do betão, sendo este um dos motivos que torna mais eficiente a presente técnica de reforço.

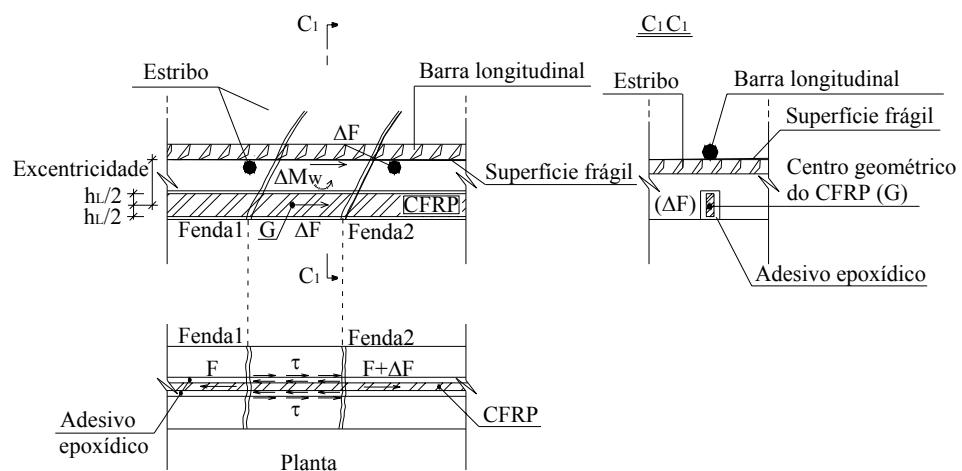


Figura 17 - Mecanismo de transferência de esforços.

Para fins práticos, o valor da carga de serviço tem importância significativa e, geralmente, o reforço da viga está relacionado com o ganho de capacidade resistente em serviço. Adoptando-se para carga de serviço o valor correspondente ao deslocamento de 3,75 mm (vão/400), conforme recomenda o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (1984), para Estados Limites de Serviço – ELS, foi possível avaliar as vigas sob condições reais de projecto.

O acréscimo de carga para ELS das peças reforçadas não é tão significativo quanto o obtido na rotura, alcançando-se o valor máximo de 45 % da respectiva viga de referência (ver Tabela 3 e Figuras 22 a 25). Utilizando a técnica tradicional de colagem do laminado na superfície inferior das estruturas de betão armado, Fortes (2000) obteve um acréscimo próximo de 30 %, e Juvandes (1999) um acréscimo de cerca de 29 % da carga de serviço. Assim, a técnica descrita no presente trabalho permite um acréscimo ligeiramente superior da carga em serviço.

A percentagem de laminados a adoptar depende, não somente do incremento de carga a garantir no elemento a reforçar, mas também da percentagem de armadura convencional existente. Assim, para se garantir um determinado incremento de capacidade de carga, a percentagem de laminado deverá ser tanto maior quanto mais elevada for a percentagem de armadura convencional, Barros *et al.* (2000). Contudo, acima de determinada percentagem de laminado a eficiência do reforço diminui não se extraindo todo o potencial de reforço que os laminados podem garantir, dado que se fica limitado pela resistência do betão do substrato.

A Tabela 3 inclui os valores de carga de rotura e de serviço alcançados pelas vigas ensaiadas. Todas as vigas reforçadas segundo a técnica proposta no presente trabalho apresentaram valores de carga de rotura próximos do dobro dos valores das correspondentes vigas sem reforço.

Tabela 3 – Valores das cargas de rotura e de serviço, obtidos experimentalmente, nas vigas ensaiadas.

Série	Viga	P_u (exp.) (kN)	$\frac{P_u(VR)}{P_u(V)}^{(1)}$	$P_{serv.}$ (exp.) (kN)	$\frac{P_{serv.}(VR)}{P_{serv.}(V)}^{(1)}$
S1	V1	28,2	1,78	18,6	1,22
	V1R1	50,3 ⁽²⁾		22,7	
S2	V2	41,0	1,91	21,7	1,45
	V2R2	78,5		31,4	
S3	V3	41,3	1,98	23,8	1,38
	V3R2	81,9		32,8	
S4	V4	48,5	1,96	32,3	1,25
	V4R3	94,9		40,4	

⁽¹⁾ VR - viga reforçada; V - viga sem reforço, utilizada como referência.

⁽²⁾ Ensaio interrompido aos 50,3 kN, devido à elevada deformação da viga.

2.4.2 Carga de Fendilhação

Com base na observação e na análise dos resultados obtidos experimentalmente, verificou-se que os valores de carga de início de fendilhação, P_{cr} , são os indicados na Tabela 4. Nesta Tabela também se apresenta uma comparação com os valores obtidos utilizando-se a formulação proposta no documento publicado pelo *American Concrete Institute* (ACI 318-95).

Os resultados obtidos para carga de fendilhação, indicam a possibilidade da presença do laminado de CFRP utilizado no reforço retarde o início da abertura de fendas. Constata-se que os valores da carga de início de fendilhação obtidos utilizando-se o ACI 318-95 são praticamente iguais aos resultados experimentais, apresentando uma acréscimo máximo de 5 %.

Tabela 4 – Cargas de fendilhação. Valores experimentais e calculados segundo as recomendações do ACI 318-95.

Série	Viga	P_{cr} (exp.) (kN)	P_{cr} (num.) ACI-318 (kN)	$\frac{P_{cr} \text{ (exp.)}}{P_{cr} \text{ (num.)}}$
S1	V1	8,5	8.1	1.05
	V1R1	10,7	7.3	1.47
S2	V2	8.1	8.0	1.01
	V2R2	12.3	8.4	1.46
S3	V3	7.9	7.5	1.05
	V3R2	11.9	7.5	1.59
S4	V4	8.1	7.9	1.03
	V4R3	14.1	8.4	1.68

Os valores experimentais das cargas de início de fendilhação enquadram-se no intervalo entre 14.5 % e 30.2 % da carga de rotura, similares aos resultados obtidos por diversos autores. Souza, 1990, obteve valores de carga de início de fendilhação no intervalo de 14.3 % a 27.6 % da carga de rotura, Clímaco, 1990, registou valores da ordem de 20.6 % a 35.3 % da carga de rotura, Reis, 1998, observou valores no intervalo de 10.0 % a 17.4 %, e Fortes, 2000, da ordem de 16.7 % a 27.3 %.

Deve-se salientar que a observação experimental do início da fendilhação é de difícil determinação. Por este motivo, os diversos autores têm encontrado valores no intervalo de 10 % a 35 % da carga de rotura, registando elevada dispersão de valores neste intervalo. A utilização de ensaio não destrutivo (p. ex.: emissão acústica) durante a realização do ensaio de vigas pode ser um procedimento auxiliar de detecção, com maior precisão, do início de fendilhação.

2.4.3 Extensões nos Laminados

A instrumentação adoptada permitiu avaliar as extensões nos laminados durante a realização dos ensaios. As extensões máximas alcançadas estão apresentadas na Tabela 5, enquanto que, as Figuras 18 a 21 mostram o nível de extensões no laminado durante a aplicação da carga de ensaio.

Tabela 5 – Extensões máximas nos laminados obtidas experimentalmente.

Série	Viga	ϵ_L (‰)
S1	V1R1	15,5
S2	V2R2	12,8
S3	V3R2	12,8
S4	V4R3	10,6

Em termos gerais verifica-se que a extensão última aumenta com a diminuição da razão entre área de laminado e de armadura convencional (ver Tabela 2), indicando que a mobilização de capacidade de reforço dos laminados diminui quando se aumenta esta razão, devido ao facto da rotura ocorrer pelo betão, numa superfície próxima das armaduras convencionais de tracção.

Após a realização das ligações constatou-se que o extensómetro 2 da viga V1R1 não estava a funcionar. Por este motivo, na Figura 18 apenas se apresentam as extensões nos extensómetros 1 e 3. As curvas de extensão registadas pelos extensómetros, em todas as vigas, mostraram-se coerentes. Ao longo do carregamento os extensómetros 2 (Ext.2) e 3 (Ext. 3) apresentaram valores próximos (zona de flexão pura), os valores menores foram registados no extensómetro 1 (Ext.1), posicionado a meio do vão de corte, e as

extensões mais elevadas foram registadas no extensómetro 3 (Ext. 3), posicionado a meio vão da viga.

Nas Figuras 18 a 21 estão assinalados pontos representativos do início da fendilhação, da cedência das armaduras convencionais e do escorregamento dos laminados (ver também Figuras 22 a 25). Estes pontos localizam-se em momentos de variação acentuada da evolução das extensões nos laminados, delimitando três tramos aproximadamente rectilíneos, representativos das três fases em que a viga apresenta acentuada diferença de rigidez (1ª fase - não fendilhada; 2ª fase – fendilhada com armadura em regime elástico; 3ª fase – fendilhada com armadura em regime plástico). Como seria de esperar, o acréscimo de extensão aumenta desde o 1º até ao 3º tramo, dada a diminuição de rigidez da viga com o evoluir do carregamento. A partir do momento em que na viga se regista flecha significativa sob marginal incremento de carga, observa-se um aumento considerável de extensão no Ext.1, consequência do deslizamento do(s) laminado(s).

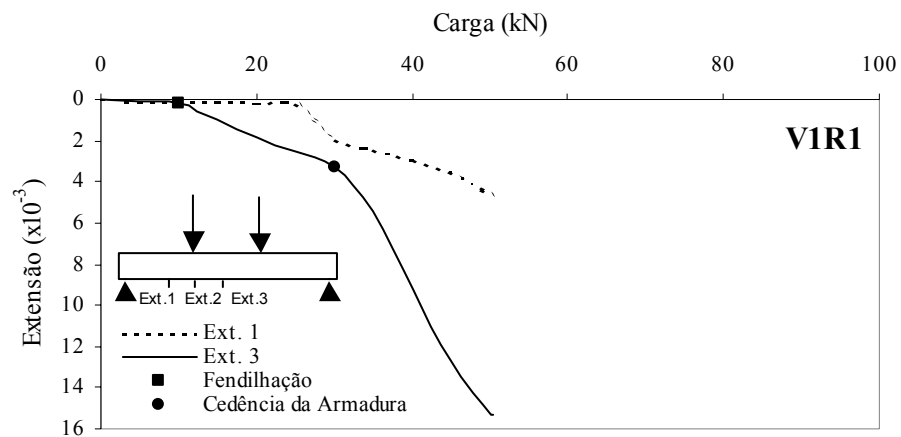


Figura 18 – Evolução das extensões nos extensómetros Ext.1 e Ext. 3 aplicados nos laminados da viga V1R1.

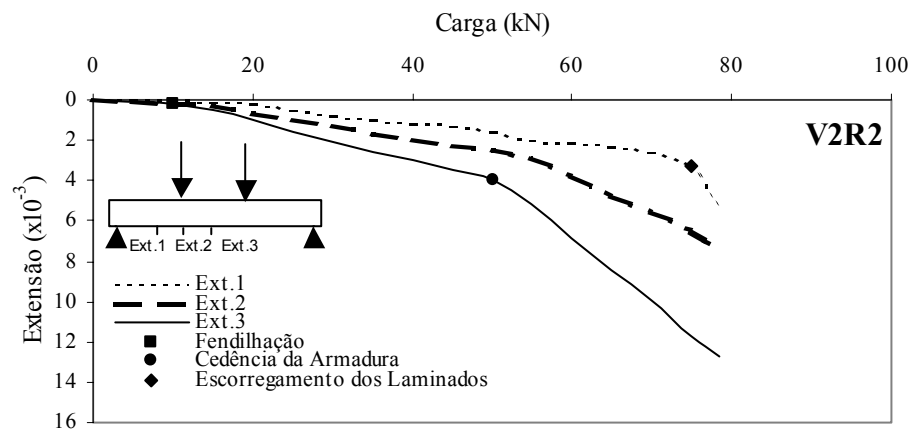


Figura 19 – Evolução das extensões nos extensômetros Ext.1, Ext.2 e Ext. 3 aplicados nos laminados da viga V2R2.

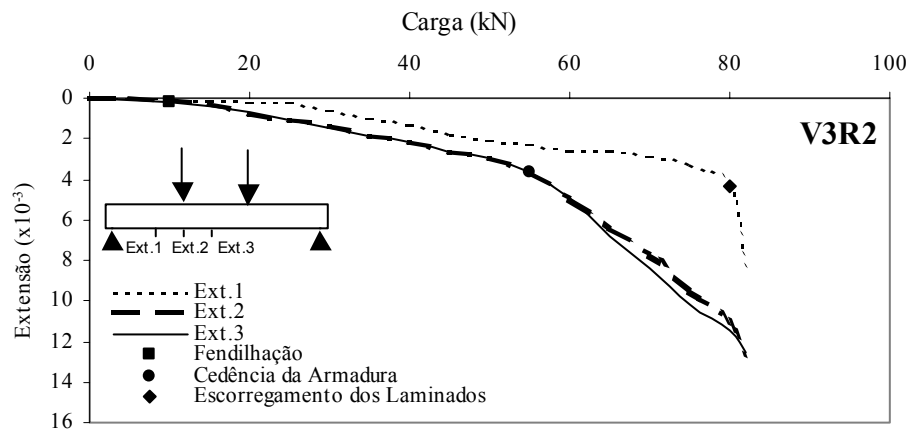


Figura 20 – Evolução das extensões nos extensômetros Ext.1, Ext.2 e Ext. 3 aplicados nos laminados da viga V3R2.

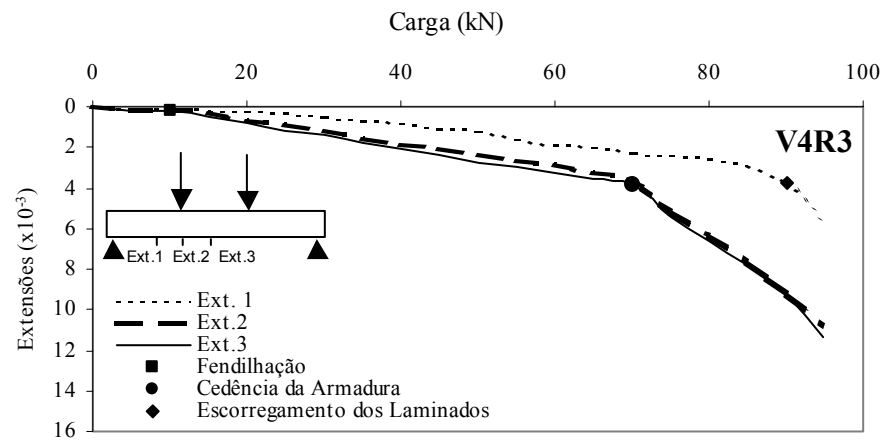


Figura 21 – Evolução das extensões nos extensômetros Ext.1, Ext.2 e Ext. 3 aplicados nos laminados da viga V4R3.

2.4.4 Deslocamentos Verticais

Nas Figuras 22 a 25 apresentam-se os diagramas de carga vs. deslocamento a meio vão, obtidos experimentalmente, para as vigas reforçadas e para as respectivas vigas de referências.

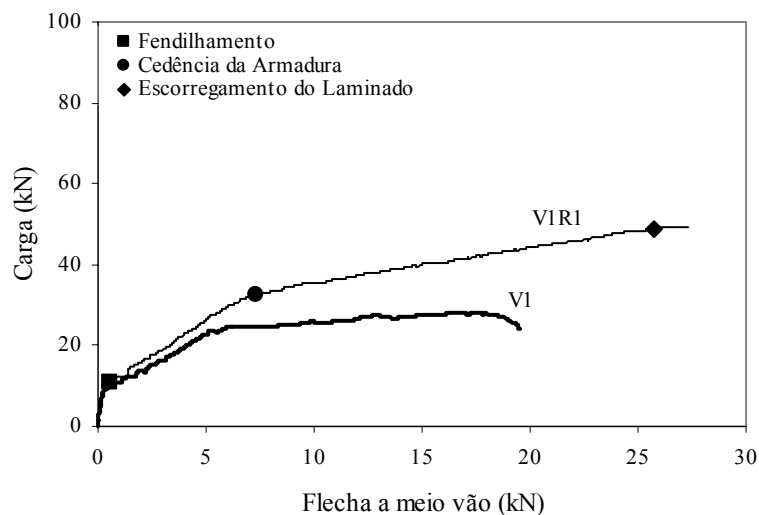


Figura 22 – Diagramas experimentais de carga vs. flecha das vigas V1 e V1R1.

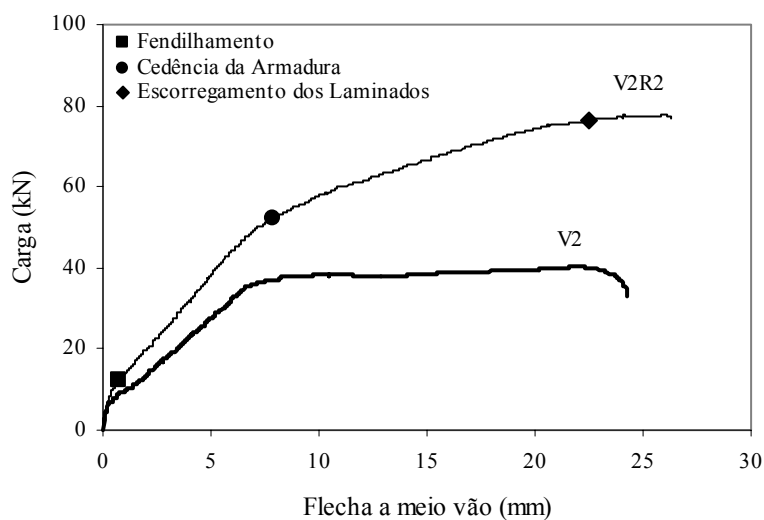


Figura 23 – Diagramas experimentais de carga vs. flecha das vigas V2 e V2R2.

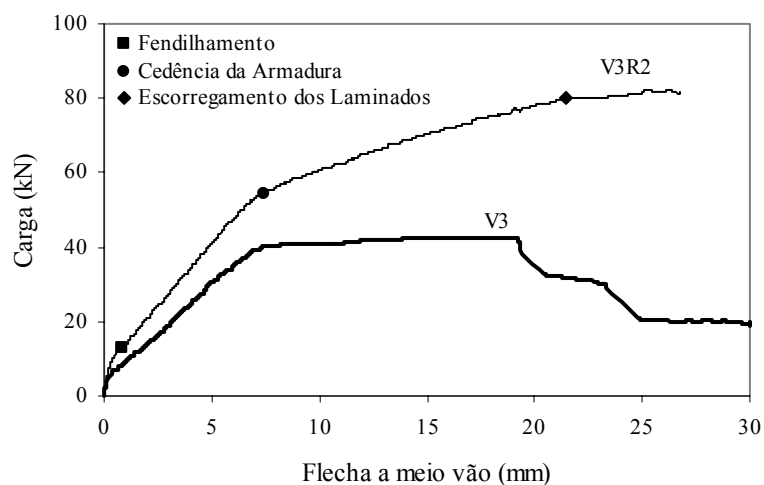


Figura 24 – Diagramas experimentais de carga vs. flecha das vigas V3 e V3R2.

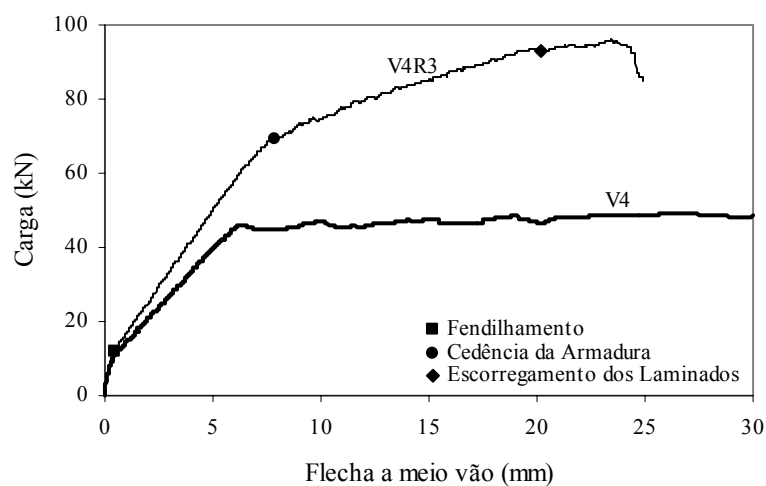


Figura 25 – Diagramas experimentais de carga vs. flecha das vigas V4 e V4R3.

As vigas de referência apresentaram comportamento semelhante, o mesmo acontecendo entre as vigas reforçadas. O resposta deformacional das vigas pode ser simulada seguindo o esquema representado na Figura 26.

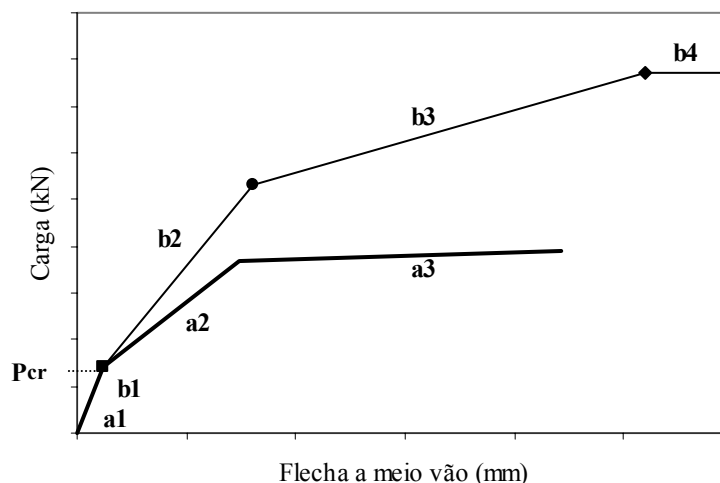


Figura 26 – Representação esquemática do diagrama carga vs. flecha das vigas de referência e das vigas reforçadas.

Vigas de Referência:

- a1) Antes do início da fendilhação – viga em regime elástico-linear;
- a2) Inicia-se a fendilhação no betão traccionado e a armadura de aço trabalha em regime elástico-linear;
- a3) Este trecho é caracterizado pela cedência da armadura longitudinal, representado no diagrama pelo patamar praticamente horizontal. Os deslocamentos aumentam sem que haja incremento significativo de carga, até que a armadura atinja deformações plásticas excessivas.

Vigas Reforçadas:

- b1) Antes do início da fendilhação – viga em regime elástico-linear. O comportamento da viga reforçada, nesta fase, é semelhante ao da viga de referência;
- b2) Inicia-se a fendilhação no betão traccionado. A armadura de aço e o laminado de *CFRP* trabalham em regime elástico-linear. Devido ao trabalho em conjunto da armadura de aço e do reforço com laminado de *CFRP* o final deste trecho ocorre para carga superior à correspondente viga de referência, sendo o deslocamento ligeiramente superior, revelativo do acréscimo de rigidez registado nas peças reforçadas;
- b3) Este trecho é caracterizado pela cedência da armadura longitudinal. Devido à presença do laminado de *CFRP* este trecho apresenta uma certa rigidez. Nesta fase, o acréscimo de carga é resistido apenas pelo laminado de *CFRP*. Por este motivo, a inclinação deste trecho (b3) é inferior à do trecho anterior (b2). Durante esta fase os

esforços de tracção/corte na região do betão reforçado aumentam significativamente;

b4) Este trecho marca o início do deslizamento do laminado, do desenvolvimento da superfície de rotura devido a se ter alcançado a resistência do betão junto à zona de reforço.

Através da comparação entre as deformadas das vigas de referência e reforçada, obtidas experimentalmente, avaliou-se o acréscimo de rigidez para os dois níveis de carga seguintes:

- 90 % do valor da carga de rotura da viga de referência ($0.9P_uV$);
- Carga de serviço (flecha/400) da viga reforçada ($P_{serv.VR}$).

As Figuras 27 a 30 mostram as deformadas das vigas, para os dois níveis de carga considerados, enquanto que na Tabela 6 apresenta-se uma comparação entre as deslocamentos verticais a meio vão das vigas com os respectivos acréscimos de rigidez.

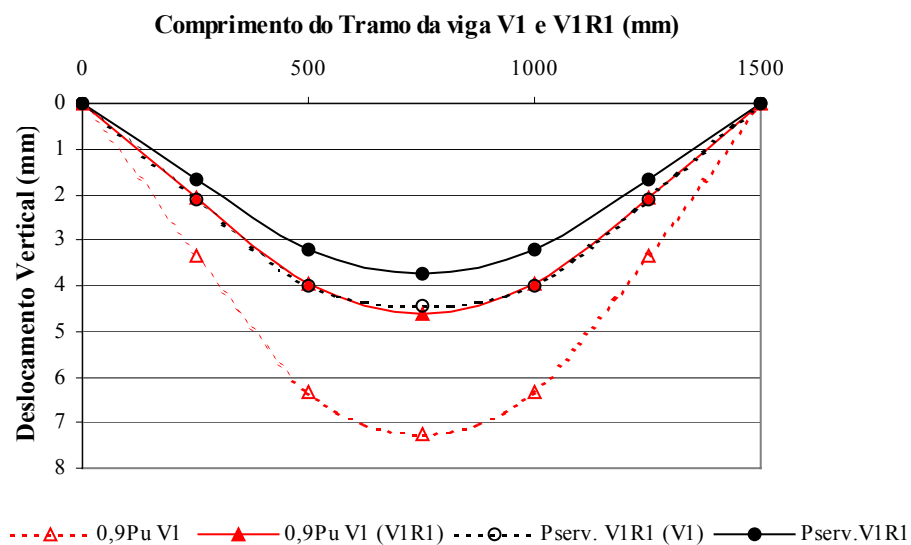


Figura 27 – Comparação entre deformadas das vigas V1 e V1R1.

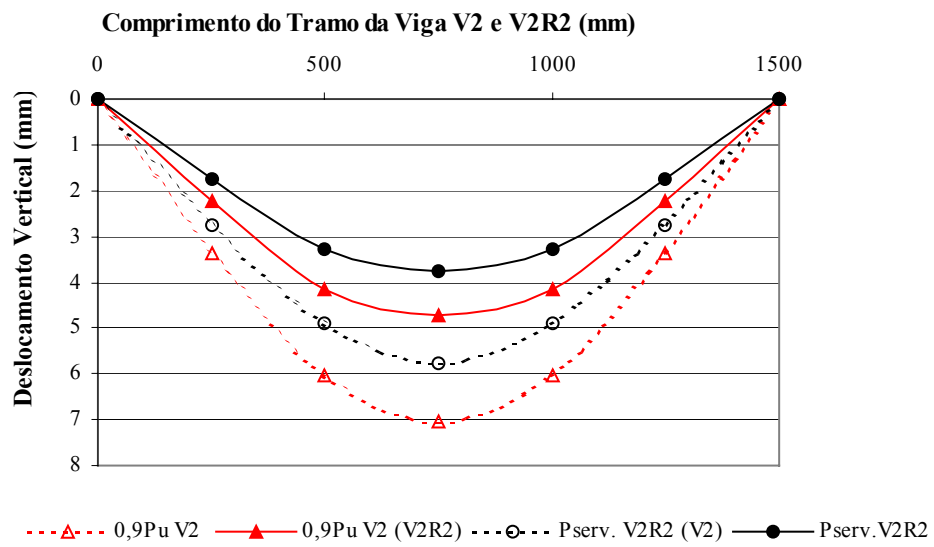


Figura 28 – Comparação entre deformadas das vigas V2 e V2R2.

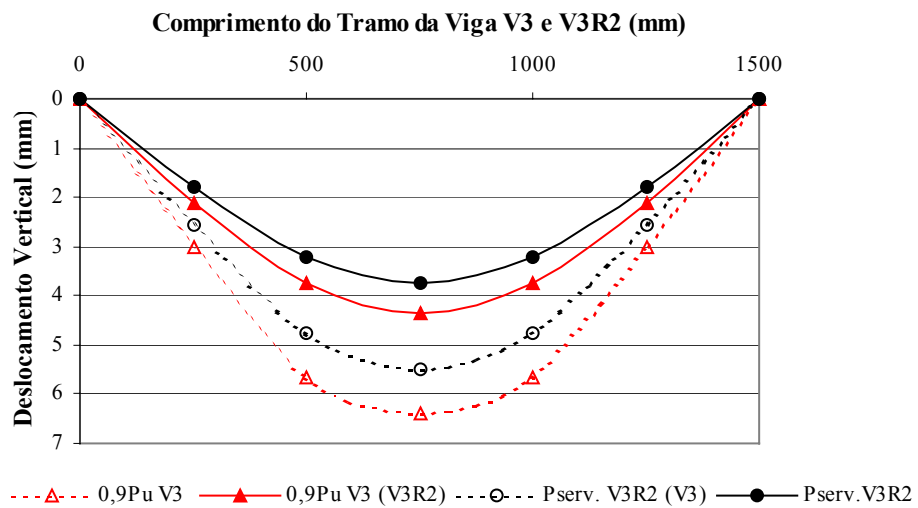


Figura 29 – Comparação entre deformadas das vigas V3 e V3R2.

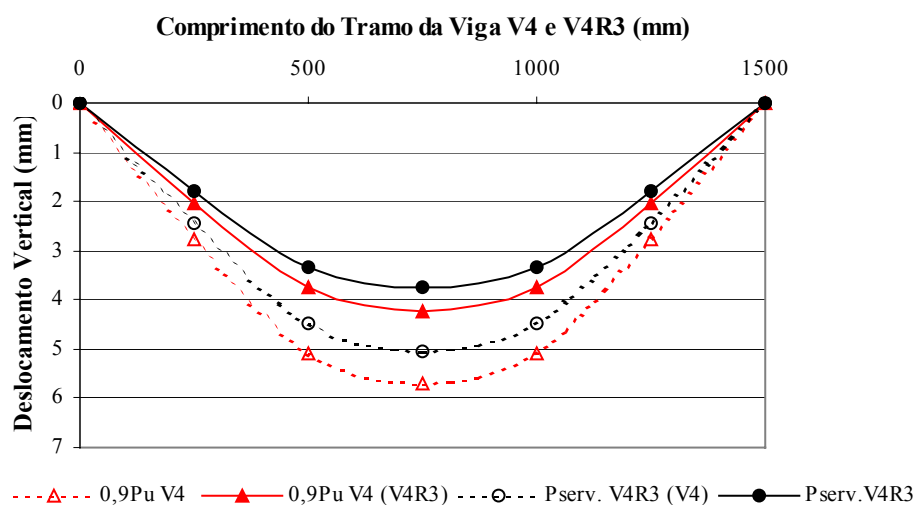


Figura 30 – Comparação entre deformadas das vigas V4 e V4R3.

Os diagramas demonstram que as vigas reforçadas apresentaram menores deformações verticais do que as respectivas vigas de referência, ao longo do carregamento. Todas as vigas reforçadas, em serviço, apresentaram-se mais rígidas do que as respectivas vigas de referências, comportamento de elevada importância para situação de projecto.

Tabela 6 – Avaliação da rigidez das vigas

Série	Viga	Carga de serviço da viga reforçada (VR)		90% da carga última da viga sem reforço (referência) (V)	
		Flecha (mm)	$\frac{(VR)}{(V)}$	Flecha (mm)	$\frac{(VR)}{(V)}$
S1	V1	4.55	1.21	7.25	1.57
	V1R1	3.75		4.62	
S2	V2	5.75	1.53	7.02	1.49
	V2R2	3.75		4.72	
S3	V3	5.48	1.46	6.40	1.47
	V3R2	3.75		4.34	
S4	V4	5.05	1.35	5.69	1.35
	V4R3	3.75		4.22	

O acréscimo médio de rigidez para o nível de carga correspondente à carga de serviço da viga reforçada foi de aproximadamente 39%. Esse acréscimo foi de 47% para um nível de carga correspondente a 90% da carga última da viga de referência. Desta forma verifica-se que o sistema de reforço proposto no presente trabalho não somente é eficaz em termos de aumento da capacidade de carga última, como também em termos de rigidez para acções correspondentes a estados limites de serviço.

3 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, as principais conclusões a serem retiradas do presente trabalho são as seguintes:

- A técnica de reforço por inserção do laminado de *CFRP* permite mobilizar quase toda a capacidade resistente do laminado, com segurança e economia;
- O aumento da capacidade resistente das vigas reforçadas foi de aproximadamente o dobro da respectiva viga de referência, tendo-se alcançado níveis de carga de rotura estabelecidas em fase de dimensionamento do sistema de reforço;
- As vigas reforçadas mostraram-se mais rígidas que as respectivas vigas de referência. O aumento de rigidez foi maior para cargas correspondentes ao Estado Limite Último do que para cargas correspondentes ao Estado Limite de Serviço;
- Com base nos resultados obtidos até o momento, constata-se que a técnica de reforço em questão indica ser mais eficaz do que a técnica de colagem do laminado sobre a superfície do betão. Para confirmar este indício será necessário proceder a uma campanha de ensaios em que provetes de iguais propriedades materiais e geométricas, reforçados com diferentes técnicas de reforço, sejam ensaiados sob iguais condições;
- A execução do reforço deve ser realizada por pessoal devidamente qualificado. Pequenas falhas em qualquer uma das fases do processo podem comprometer o desempenho da estrutura reforçada.

4 AGRADECIMENTOS

O aluno de doutoramento agradece ao Departamento de Engenharia Civil e ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho – Portugal; ao Professor Dr. Joaquim Barros; aos Professores Salvador Dias e José Sena e aos Funcionários José Gonçalves e Mattos; à Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior – CAPES – Brasil; e a BETTOR Master Builders Technologies.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “*Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*”. Detroit, 1995.
- BARROS, J. A. O. de, FERREIRA, D. R. S. M., LOURENÇO P. B., “*Comportamento de Pilares de Betão Armado Reforçados co Laminados de Fibras de Carbono*”. Encontro Nacional de Betão Estrutural, p. 393-402. Porto:FEUP, Novembro de 2000.
- BARROS, J.A.O., FORTES, A.S. - “Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits”, *5º Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Madrid, 3-6 Junio 2002.
- BLASCHKO M., ZILCH, K., “*Rehabilitation of Cpncrete Structures with CFRP Strips Glued into Slits*” 12º International Conference on Composite Materials, Paris, 1999.
- CLÍMACO, J. C. T. (1990). *Repair of Structural Concrete Involving the Addition of New Concrete*. Tese (Doutorado). Londres. Polytechnic of Central London, U.K.
- FORTES, A. S. “*Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Fibras de Carbono*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2000.
- INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (fib) “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*” CEB-FIP - grupo de trabalho 9.3, julho de 2001.
- ISO 527-3 1997. Plastics – Determination of tensile properties. Part 3: Test conditions for films and sheets. *International Standard ISO*: 5 pp. Genève, Switzerland.
- ISO 527-5 1997. Plastics – Determination of tensile properties. Part 3: Test conditions for unidirectional fiber-reinforced plastic composites. *International Standard ISO*: 9 pp. Genève, Switzerland.
- JUVANDES, L., “Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, setembro, 400 pp., 1999.
- REGULAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO, Decreto Lei n. 349-C/83, Porto Editora, setembro de 1984.

- REIS, A. P. A. (1998). *Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.
- SENA CRUZ, J.M., BARROS, J.A.O., FARIA, R.M.C.M., “*Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests*”, International Conference Composites in Construction, pp. 217-222, 10-12 October 2001.
- SOUZA, R. H. F. (1990). *Análise do Comportamento de Vigas de Betão Armado Reforçadas à Flexão e ao Esforço Transverso*. Tese (Doutorado), Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.